

**М.А. Мислюк**

д-р техн. наук

ІФНТУНГ

**З.Д. Хоминець**

д-р техн. наук

ТзОВ «ЕМПІ-Сервіс»

**Ю.М. Салижин**

канд. техн. наук

**В.В. Богославець****Ю.Д. Волошин**

ІФНТУНГ

## Деякі напрями удосконалення технологій спорудження свердловин на сланцевий газ

УДК 622.24

На основі аналізу світового досвіду сформульовано напрями удосконалення технологій спорудження свердловин на сланцевий газ. Особливу увагу приділено якості спорудження свердловин, технологіям розкриття й освоєння продуктивних пластів.

На основании анализа мирового опыта сформулированы направления совершенствования технологий строительства скважин на сланцевый газ. Особое внимание уделено качеству строительства скважин, технологиям вскрытия и освоения продуктивных пластов.

Based on the analysis of international practices the directions for improvement of the construction technologies for shale gas wells are worded. Particular attention is paid to the quality of the well construction, technologies of drilling-in and development of a payout beds.

За експертними оцінками [1–3], на території України зосереджені значні (понад 1,1 трлн м<sup>3</sup>) запаси сланцевого газу, що відкриває можливості поповнення енергетичних ресурсів за рахунок власного видобування газу. Сланцевий газ належить переважно до розсіяного газу в порово-тріщинних порожнинах, пов'язаних із особливостями нашарування пелітоморфних сланцевих товщ, включаючи газ закритих пор і сорбований мінеральними та органічними речовинами, що приурочений до слабопроникних пластів і зумовлює низькі дебіти свердловин [2].

На сьогодні в Україні досвіду спорудження свердловин на сланцевий газ немає. Тому важливим є вивчення та узагальнення світового досвіду, що дає змогу вдосконалити технології спорудження свердловин.

### Аналіз світового досвіду спорудження свердловин

Специфічні особливості видобування сланцевого газу вимагають використання технологій буріння свердловин, спрямованих на підвищення їх продуктивності. Спорудження свердловин на сланцевий газ здійснюють із використанням технологій буріння горизонтальних стовбурів, а інтенсифікації припливу газу – за допомогою багатостадійного гідравлічного розриву пласта (ГРП) [3–5].

Досвід спорудження свердловин на родовищах Barnett, Woodford, Haynesville, Bakken, Fayetteville та ін. [3, 4] показує, що кожне родовище сланцевого газу потребує власної технології розробки. Це зумовлено особливостями геологічної будови родовищ, властивостями порід і різною природою утримування газу. На рис. 1 систематизовано основні проблеми під час буріння свердловин на сланцевий газ.

Для буріння горизонтальних стовбурів використовують бурові розчини на водній і нафтовій основі. Горизонтальні стовбури переважно кріплять обсадними колонами і цементують. На родовищі Bakken свердловини закінчують відкритим стовбуром або незацементованим хвостовиком, на родовищі Fayetteville також спостерігається тенденція до відкритого завершення свердловин із

використанням манжет і пакерів [4]. У [5] для інтенсифікації припливу газу розглядається ГРП із використанням технологічних рідин на основі пропану.

У [6, 7] рекомендовано технологію керованого колтубінгового буріння горизонтальних стовбурів в умовах депресії на продуктивний пласт, так звана технологія UBD (underbalanced drilling). Така технологія перспективна і має ряд переваг, зокрема:

- підвищення механічної швидкості буріння;

- запобігання забрудненню продуктивного пласта;

- оцінка параметрів продуктивного пласта в режимі реального часу за рахунок використання кабельного каналу зв'язку і систем скерованого буріння;

- можливість проходження стовбура свердловини в пластах малої товщини та ін.

Для створення депресії в окремих випадках ефективно застосовувати азотні установки криогенного типу.

Колтубінгові технології успішно застосовують для інтенсифікації видобутку газу за допомогою технологій RDS або радіального буріння (компанія «Radial Drilling Services, Inc.», США) і ГРП.

### Система оцінювання якості свердловин

В основу структури менеджменту якості спорудження нафтогазових свердловин покладено поняття якості і системи її оцінювання [8]. Комплекс показників, що характеризують нафтогазову свердловину з позицій виконання основних вимог до неї відповідно з проектом розробки родовища, визначає якість свердловини як інженерної споруди.

У загальному випадку якість свердловини потрібно оцінювати за гнучкою ієрархічною структурою критеріїв залежно від призначення і траєкторії свердловини, виду і гірничогеологічних умов буріння та інших факторів. Верхній рівень ієрархічної структури має включати критерії, які характеризують якість траєкторії свердловини, її кріплення, розкриття продуктивних горизонтів, а також екологічні вимоги.



Рис. 1. Проблеми видобування сланцевого газу

Запропонована відкрита ієрархічна структура критеріїв якості нафтогазових свердловин, яка допускає їх можливі доповнення і виключення на різних рівнях ієрархії (рис. 2). Це забезпечить більш достовірну оцінку якості свердловини залежно від її призначення та особливостей.

**Геометричні критерії** оцінюють якість свердловини за відповідністю її траєкторії проектному завданню.

**Критерії кріплення** оцінюють надійність (готовність, безвідмовність, ремонтпридатність) свердловини як технічної споруди з позицій виконання її функціональних завдань. Оцінку якості свердловини за критеріями кріплення може бути виконано окремо за обсадною колоною (в тому числі гірлового і свердловинного обладнання) і розмежуванням пластів.

**Критерії розкриття продуктивних пластів** оцінюють ефективність технологій завершення свердловин із позицій збереження колекторських властивостей.

**Екологічні критерії** оцінюють якість свердловини за показниками охорони надр і довкілля. У загальному випадку структура екологічних критеріїв складна, що зумовлено різним характером забруднення довкілля. Її вибір залежить від місця розташування свердловини та чинної системи екологічного моніторингу.

Система критеріїв і принципи оцінювання якості можуть бути реалізовані на етапах проектування і спорудження свердловин [8], що дає можливість формулювати підвищені вимоги до проектів із метою досягнення високої якості спорудження свердловин.

**Принципи оцінювання якості технологічних операцій**

Зрештою, якість свердловини залежить від переліку та послідовності технологічних процесів, відповідності їх параметрів гірничегеологічним умовам буріння тощо. Таким чином, цілеспрямований контроль і керування технологічними процесами є невід'ємною частиною системи менеджменту якістю спорудження свердловин.

Технології поглиблення і завершення свердловин подаються відповідними поєднаннями основних операцій. Кожна операція характеризується сукупністю відповідних параметрів та системою певних обмежень на їх параметри, що визначають якість виконання операції.

Загалом оцінювання якості технологічних операцій зводиться до виділення основних і контрольованих параметрів, формування системи обмежень за умов безпечного ведення бурових робіт і забезпечення якості спорудження свердловини, обґрунтування критерію оптимальності і параметрів операцій [8].

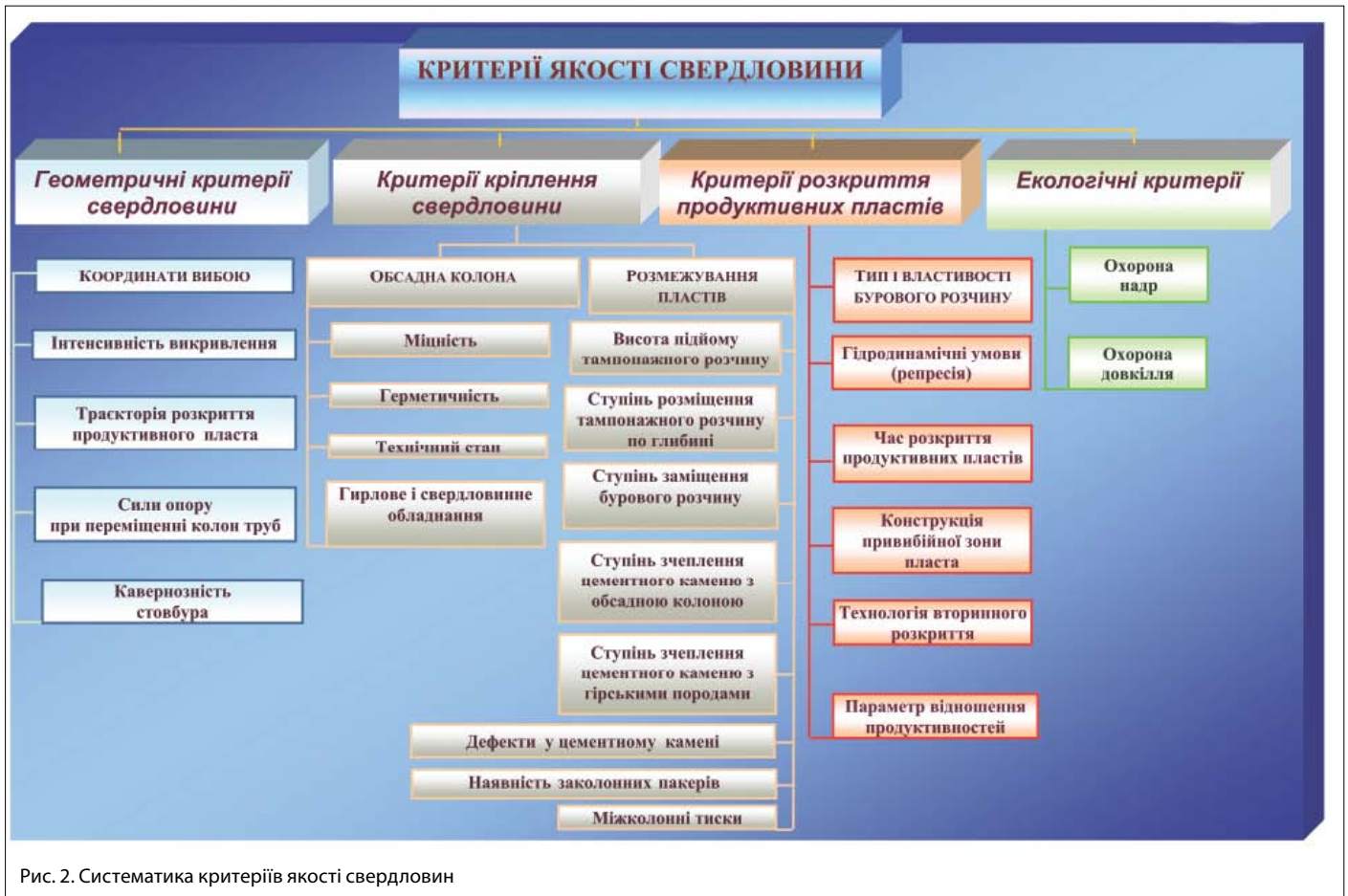


Рис. 2. Систематика критеріїв якості свердловин

Ефективність технологічних операцій поглиблення свердловин визначають критерії, що відповідають мінімальній вартості спорудження свердловин.

Критерії ефективності технологічних операцій завершення свердловин мають бути спрямованими на підвищення якості розкриття продуктивних горизонтів і надійності свердловини як технічної споруди.

Система оцінки якості технологій спорудження свердловин повинна включати стандарти на виконання кожної технологічної операції для відповідних умов буріння. Стандарти мають вміщувати рекомендації з вибору значень параметрів, їх моніторингу та аналізу і внесення змін у технологічну операцію з метою підвищення її якості. Параметри технологічних операцій  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$  вибирають із умов безпечного ведення бурових робіт, виконання обмежень  $\varphi(x)$  для забезпечення якості свердловини та оптимальності критерію  $K_l(x, a)$  ефективності

$$\begin{cases} K_l(x, a) \rightarrow \min, l \in L, x \in D; \\ \varphi(x) \leq 0, \end{cases} \quad (1)$$

де  $D$  – область визначення параметрів технологічних операцій;  $a = (a_1, a_2, \dots, a_m)^T$  – вектор параметрів моделі.

Отже, на основі викладеного можна запропонувати чотирибальну систему оцінювання якості технологічних операцій:

*дуже висока* – параметри технологічних операцій від-

повідають прийнятій системі обмежень і обґрунтованому критерію оптимальності;

*висока* – параметри технологічних операцій відповідають прийнятій системі обмежень і хоча б один із них не відповідає обґрунтованому критерію оптимальності;

*задовільна* – параметри технологічних операцій відповідають прийнятій системі обмежень і хоча б один із них не відповідає обмеженням забезпечення якості спорудження свердловини;

*незадовільна* – параметри технологічних операцій відповідають прийнятій системі обмежень і хоча б один із них не відповідає умовам безпечного ведення бурових робіт.

#### Технології розкриття продуктивних пластів

Збереження природної проникності продуктивних пластів є найважливішою вимогою до технологій завершення свердловин. Від ефективного її вирішення залежить продуктивність свердловин і ступінь вилучення вуглеводнів у процесі розробки родовищ.

Запобігання забрудненню продуктивного пласта потребує комплексного і детального підходу до її вирішення і базується на науковій основі. У загальному випадку методи запобігання забрудненню продуктивного пласта охоплюють вибір конструкції свердловини, технології первинного і вторинного розкриття пласта, вибір системи бурового розчину, керування гідро- і термодинамічними умовами розкриття пласта [9]. Вибір конструкції свердло-



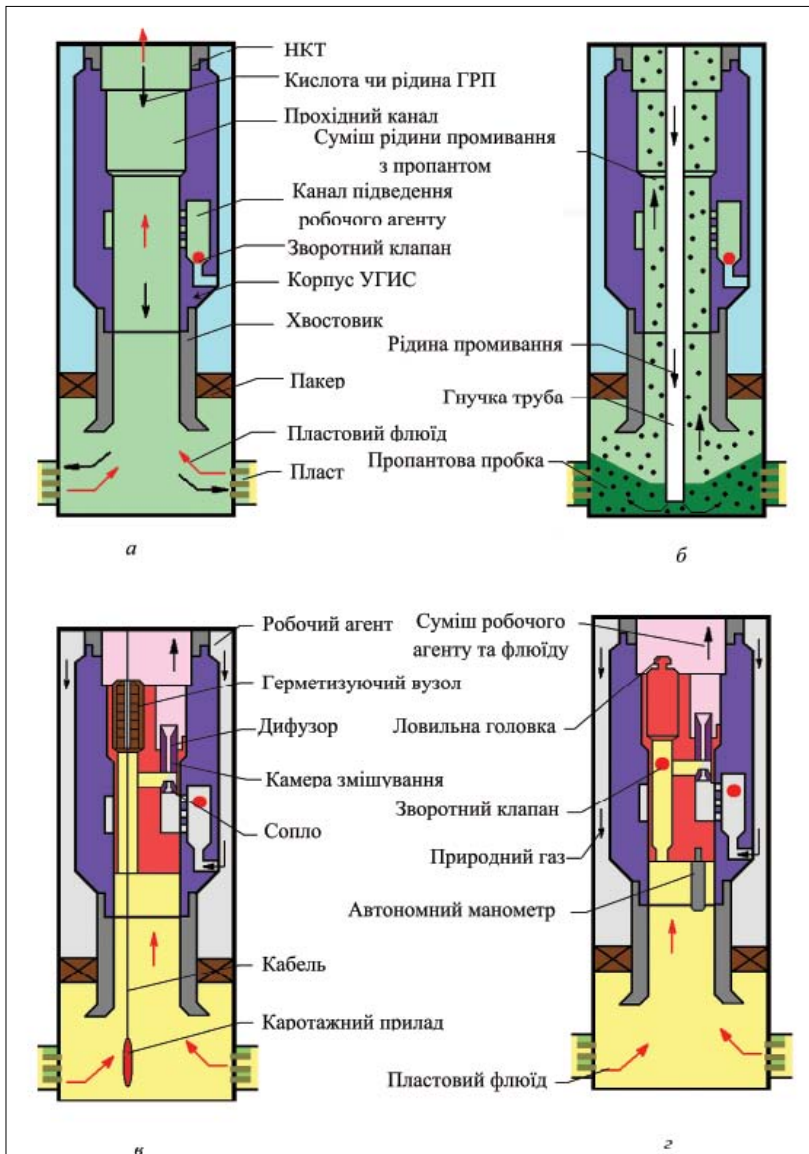


Рис. 3. Схема компонування УГІС-(31–40) Ш для освоєння і експлуатації свердловин: а – робота з корпусом УГІС для кислотної обробки, ГРП, фонтанної експлуатації (клапан закритий); б – робота з корпусом УГІС для промивання вибою від пропанту за допомогою колтюбінгу (клапан закритий); в – робота з каротажним ежектором для видалення продуктів реакції і рідини ГРП із пласта, геофізичних досліджень у режимі припливу, реєстрації індикаторних кривих (клапан відкритий); г – робота з гідродинамічним ежектором для видалення продуктів реакції і рідини ГРП із пласта, виклику припливу, реєстрації індикаторних кривих, видобування нафти і конденсату (клапан відкритий) та реєстрації кривих відновлювання тиску (клапан закритий)

вини та реалізація кожної технологічної операції на етапі її завершення мають здійснюватися з урахуванням вимог до якісного розкриття продуктивних горизонтів.

Найбільш надійними для запобігання забрудненню продуктивних горизонтів є технології UBD (із від'ємним диференціальним тиском) [10], які застосовують провідні бурові компанії світу. Вважається доведеним, що потенційні можливості технологій завершення свердловин можуть

бути досягнуті тільки під час розкриття продуктивних пластів на депресії.

Важливі вимоги до вибору систем бурових розчинів для розкриття продуктивних пластів стосуються їх складу, технологічних властивостей (густина, фільтраційні і реологічні властивості, водневий показник та ін.), ступеня мінералізації і складу солей фільтрату бурового розчину, поверхневих властивостей на межі поділу фаз фільтрат – флюїд.

Керування гідродинамічними умовами під час виконання різних технологічних операцій відповідно до (1) є необхідним для забезпечення якісного розкриття продуктивного пласта. Для технологічних операцій, які підвищують гідродинамічний тиск у свердловині, умову запобігання забрудненню можна формалізувати обмеженням репресії на пласт

$$p_j(z_{\text{п}}) \leq p_{\text{п}} + \Delta p_{\text{max}}^+ \quad (2)$$

де  $p_j(z_{\text{п}})$  – гідродинамічний тиск у свердловині на глибині  $z_{\text{п}}$  продуктивного пласта під час виконання  $j$ -ої технологічної операції;  $\Delta p_{\text{max}}^+$  – максимально допустима репресія на пласт (наприклад, під час розкриття пласта у ході механічного буріння).

**Система для дослідження реологічних властивостей** призначена для обробки даних ротаційної віскозиметрії бурових технологічних рідин, побудована на строгому розв'язку основного рівняння ротаційної віскозиметрії та враховує інформаційну змістовність дослідів [11]. Клас реологічно стаціонарних моделей включає поширені у буровій практиці моделі Ньютона, Шведова–Бінгама, Оствальда, Гершеля–Балклі, Шульмана–Кессона, а також бів'язкі моделі вигляду

$$\dot{\gamma} = \begin{cases} \dot{\gamma}(\tau, a^{(1)}), \tau \leq \tau^*; \\ \dot{\gamma}(\tau, a^{(2)}), \tau > \tau^*, \end{cases}$$

де  $a^{(1)}, a^{(2)}$  – реологічні властивості моделей для низьких і високих градієнтів швидкостей зсуву  $\dot{\gamma}$ ;  $\tau^*$  – граничне напруження зсуву, що визначається з розв'язку рівняння  $\dot{\gamma}(\tau, a^{(1)}) = \dot{\gamma}(\tau, a^{(2)})$ .

Система забезпечує побудову адекватних оцінок реологічних моделей і властивостей, матриці коваріацій оцінок реологічних властивостей, пакетну обробку масиву даних, побудову баротермічних та інших рівнянь стану реологічних властивостей. Це важливо для

моделювання гідродинамічних процесів (оцінка виносної здатності бурових розчинів [12], керування гідродинамічними умовами за (2) та ін.) із метою прийняття ефективних технологічних рішень. За функціональними можливостями система переважає відомі аналоги.

**Система вибору оптимальних рецептур бурових розчинів** побудована з використанням моделі вигляду (1) [13]

$$\begin{cases} E(x^v) \rightarrow \min, v \in \mathcal{Q}, x^v \in D^v; \\ \varphi(x^v) \leq 0, \end{cases} \quad (3)$$

де  $E(x^v)$  – критерій оптимальності;  $x^v$  – вектор концентрацій реагентів  $v$ -го компонентного складу;  $\mathcal{Q}$  – клас допустимих наборів реагентів;  $D^v$  – область визначення вектора  $x^v$ ;  $\varphi(x^v)$  – система обмежень на концентрації реагентів.

Особливістю моделі (3) є попередній вибір локального критерію  $E(x^v)$  оптимальності з деякої множини можливих, який для заданих умов буріння найкращою мірою відповідає глобальному критерію. Залежно від умов розкриття продуктивного пласта можна використовувати різні критерії оптимальності: вартість одиниці об'єму бурового розчину, відповідність певних показників властивостей заданим значенням, виносна здатність потоку бурового розчину в заданому інтервалі свердловини, відносне зменшення проникності кернавого матеріалу тощо. Інформаційне забезпечення моделі (3) ґрунтується на результатах експериментальних досліджень за відповідними планами.

Для розкриття низькопроникних продуктивних пластів у [13] рекомендовано двоетапну процедуру вибору бурового розчину. На першому етапі вибирають базові рецептури із умови мінімальної вартості, а на другому – оптимальну рецептуру бурового розчину за критерієм мінімального міжфазного натягу на межі поділу фаз фільтрат бурового розчину–флюїд.

Створено систему підтримки прийняття рішень, яка допускає довільний вибір критерію оптимальності та системи обмежень, побудову і супровід планів експериментів, інтерпретацію їх результатів, пошук оптимальної рецептури бурового розчину. Цю систему можна використовувати для вибору оптимальної рецептури обробки бурового розчину в процесі буріння свердловин.

#### Технології освоєння свердловин

Освоєння свердловини зводиться до виклику припливу флюїду, очищення привибійної зони пласта від фільтрату бурового розчину та інших забруднюючих домішок, проведення необхідних робіт із метою підвищення фільтраційних характеристик пласта і передавання свердловини в експлуатацію.

Параметри всіх технологічних операцій під час освоєння свердловин мають відповідати вимогам якості за (1). Технологічні радії для освоєння свердловин слід вибирати з використанням моделі вигляду (3).

Для освоєння сланцевих свердловин із ГРП можуть бути ефективно використані технології ТзОВ «ЕМПІ-сервіс», які допускають реалізацію необхідних технологічних процесів за одне спускання комплексу інструменту з ежекторними насосами УГИС серій 11–20, 31–40 і 41–50 [14, 15], зокрема:

промислово-геофізичні та гідродинамічні дослідження до ГРП;

ГРП через ежекторний насос УГИС;

видалення робочої рідини ГРП і пропанту із пласта за допомогою УГИС;

повторні промислово-геофізичні та гідродинамічні

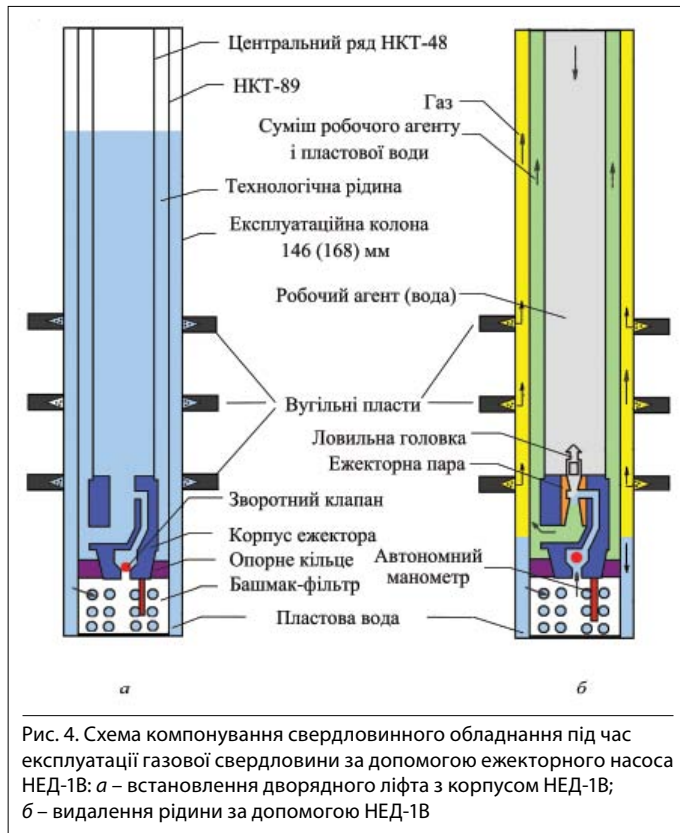


Рис. 4. Схема компоновання свердловинного обладнання під час експлуатації газової свердловини за допомогою ежекторного насоса НЕД-1В: а – встановлення дворядного ліфта з корпусом НЕД-1В; б – видалення рідини за допомогою НЕД-1В

дослідження. Технології застосовують у вертикальних і похило-скерованих свердловинах у поєднанні з кольтюбінговими установками [14, 15].

На рис. 3 показано схему компоновання інструмента ежекторними насосами УГИС-(31–40)Ш для дослідження й освоєння свердловин із аномально-низькими пластовими тисками (АНПТ) за допомогою ГРП. Тут із одним корпусом використовують різні вставні ежекторні пристрої, а також зворотну (рис. 3, в та г) і пряму (рис. 3, а та б) циркуляцію рідин.

Для експлуатації метано-вугільних і сланцевих свердловин із АНПТ розроблено конструкцію вставних ежекторних насосів НЕД-1В [16], які застосовують із дворядним компонованням насосно-компресорних труб діаметрами 48 і 89 мм. Ежекторні насоси НЕД-1В мають високу експлуатаційну надійність за наявності газу і механічних домішок у флюїді, заміна ежекторних пар не потребує використання бригад капітального ремонту свердловин і канатної техніки.

На рис. 4 показано схему компоновання свердловинного обладнання для експлуатації газової свердловини з АНПТ за допомогою ежекторного насоса НЕД-1В. Як робочий агент може виступати технічна вода. Для забезпечення технологічних вимог експлуатації газокompресорних станцій схема компоновання включає використання дворядного ліфта по всій довжині свердловини. Схему компоновання можна застосовувати й за умови довільної кривизни стовбура свердловини.

Технології ТзОВ «ЕМПІ-сервіс» із використанням

ежекторних насосів УГИС використовують на родовищах Росії [14, 15]. Ежекторний насос НЕД-1В успішно проходить випробування на метановугільних свердловинах Російської Федерації.

На основі зазначеного у статті до можливих напрямів удосконалення технологій спорудження свердловин на сланцевий газ можна віднести:

систему оцінювання якості спорудження свердловин;  
систему оцінювання якості технологічних операцій;  
технології запобігання забрудненню продуктивних пластів за рахунок вибору властивостей технологічних рідин і керування гідродинамічною ситуацією в свердловині;

багатофункціональні ежекторні компоновки і технології освоєння та експлуатації свердловин.

#### Список літератури

1. **Гурский Д.С.** Сланцевый газ и проблемы энергообеспечения Украины / Д.С. Гурский, В.А. Михайлов, П.М. Чепиль [и др.] // Мінеральні ресурси України. – 2010. – № 3. – С. 3–7.
2. **Маєвський Б.Й.** Щодо природи сланцевого газу і ефективності його пошуків / Б.Й. Маєвський, С.С. Куровець, В.Р. Хомин, Т.В. Здерка // Нафт. і газова пром-сть. – 2012. – № 3. – С. 50–54.
3. **Гошовский С.В.** Развитие новых геофизических технологий для разведки и разработки сланцевого газа / С.В. Гошовский, П.Т. Сиротенко // 36. наук. праць УкрДГРІ. – 2012. – № 1. – С. 9–32.
4. **U.S. Shale Gas.** An Unconventional Resource. Unconventional Challenges: White paper / Halliburton. – 2008. – 8 pp. – Режим доступу: [http://www.halliburton.com/public/solutions/contents/Shale/related\\_docs/H063771.pdf](http://www.halliburton.com/public/solutions/contents/Shale/related_docs/H063771.pdf)
5. **LeBlanc D.** Energy services propane-based fracturing improves well performance in Canadian tight reservoirs / D. LeBlanc, L. Huskins, R. Lestz // World oil. – Issue 7. – 2011. – P. 39–46.
6. **Сидоров И.** Сланцевый газ / И. Сидоров // Время кольтюбинга. – 2011. – № 6 (038). – С. 74–81.
7. **Груздилович Л.М.** Оборудование и технологические возможности добычи сланцевого газа / Л.М. Груздилович, Н.А. Демяненко // Время кольтюбинга. – 2012. – № 1 (039). – С. 18–25.
8. **Мислюк М.А.** Принципы створення системи керування якістю спорудження нафтових і газових свердловин / М.А. Мислюк, І.Й. Рибич, Д.О. Єгер [та ін.] // Нафт. і газова пром-сть. – 2007. – № 1. – С. 9–13.
9. **Мислюк М.А.** Попередження забруднення продуктивних пластів під час їх розкриття / М.А. Мислюк, А.О. Васильченко // Нафт. і газова пром-сть. – 2009. – № 1. – С. 23–25.
10. **Тейхроб Р.** Как изменяется технология бурения с отрицательным дифференциальным давлением / Р. Тейхроб, Д. Бейлларджен // Нефтегазовые технологии. – 2000. – № 6. – С. 43–57.
11. **Myslyuk M.** The evaluation rheological parameters of non-Newtonian fluids by rotational viscosimetry / M. Myslyuk, I. Salyzhyn // Applied Rheology. – 2012. – Т. 22. – Вип. 3. – Рр. 32381 (7 p.).
12. **Мыслук М.А.** Об оценке выносной способности промывочной жидкости при бурении скважин / М.А. Мыслук // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2012. – № 3. – С. 29–32.
13. **Мыслук М.А.** Выбор оптимальной рецептуры бурового раствора для вскрытия продуктивных пластов / М.А. Мыслук,

Ю.М. Салыжин, В.В. Богославец // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2009. – № 2. – С. 35–39.

14. **Хоминец З.Д.** Применение многофункциональных ресурсосберегающих компоновок НКТ при испытании, освоении и эксплуатации скважин / З.Д. Хоминец // Нефтяное хозяйство. – 2010. – № 2. – С. 87–91.

15. **Хоминец З.Д.** Применение кольтюбинг-эжекторных установок для испытания, освоения и эксплуатации нефтегазовых скважин / З.Д. Хоминец // Нефтяное хозяйство. – 2010. – № 11. – С. 112–116.

16. **Пат. 2384755 РФ,** МПКF04F 05/10 (2006.01). Способ работы скважинной струйной насосной установки / З.Д. Хоминец. – Опубл. 20.03.2010., Бюл. № 8.

#### Автори статті



**Мислюк Михайло Андрійович**

Д-р техн. наук, професор кафедри буріння нафтових і газових свердловин ІФНТУНГ. Напрями наукових інтересів – вибір і прийняття технологічних рішень у бурінні свердловин, моделювання процесів буріння.

**Хоминець  
Зіновій  
Дмитрович**

Д-р техн. наук, директор ТзОВ «ЕМПІ-Сервіс». Напрями наукових інтересів – розробка технічних засобів і технологій інтенсифікації видобування нафти і газу.



**Салыжин Юрій  
Мирославович**

Кандидат технічних наук, доцент кафедри буріння нафтових і газових свердловин ІФНТУНГ. Напрями наукових інтересів – розробка програмного забезпечення для вирішення прикладних задач буріння свердловин, оптимізація технологічних процесів, бурові розчини.



**Богославец  
Володимир Васильович**

Аспірант кафедри буріння нафтових і газових свердловин ІФНТУНГ. Закінчив Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, спеціальність буріння. Сфера наукових інтересів – удосконалення технологій розкриття продуктивних пластів.



**Волошин Юрій Дмитрович**

Асистент кафедри буріння нафтових і газових свердловин ІФНТУНГ. Закінчив Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, спеціальність буріння. Сфера наукових інтересів – технології буріння свердловин на сланцевий газ.

